

FOTOVOLTAİK TERMAL (PVT) SİSTEM 2D TERMODİNAMİK MODELLEMESİ VE DENEYSEL SONUÇLARLA KARŞILAŞTIRILMASI

Canan KANDİLLİ
Gürhan KÜLAHLI
Gültekin SAVCI

ÖZET

Binalarla bütünleşik güneş enerjisi sistemleri arasında fotovoltaik termal sistemler (PVT), hem elektrik hem de sıcak su ihtiyacını karşılaması ile giderek artan bir ilgi görmektedir. PVT sistemlerden en yüksek enerji veriminin elde edilmesi ve optimum çalışma koşullarında işletilmesi, bu sistemlerin tasarımı aşamasında ayrıntılı ısı transfer analizlerinin yapılmasını ve termodinamik modellerinin ortaya konmasını gerektirmektedir. Bu çalışmada, Uşak Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde tasarlanan ve deneysel olarak test edilen, ısı transfer akışkanı olarak suyun kullanıldığı ve monokristal silisyum fotovoltaik modülden oluşan bir PVT sistemin 2D ısı transfer analizi ve termodinamik modellemesi COMSOL Multiphysics yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. Ölçümlenen ve model sonucu hesaplanan çıkış suyu sıcaklıkları arasındaki determinasyon katsayısı 0,94, korelasyon katsayısı 0,97; MSE değeri 3,67 ve RMSE değeri 1,92 olarak bulunmuştur. Ortalama değerler üzerinden değerlendirilecek olursa; 620 W/m² güneş ışınımı, 13°C dış ortam sıcaklığı koşulları altında, 20°C giriş suyu sıcaklığında, deney sonuçlarına göre hesaplanan ortalama ısı verim 0,27 olarak hesaplanırken, simülasyon sonuçlarına göre hesaplanan ortalama ısı verim 0,22 olarak bulunmuştur. PVT modülün toplam enerji verimi ise deneysel olarak 0,38, simülasyon sonuçlarına göre 0,33 olarak ortaya konmuştur. Buna göre deney ve simülasyondan elde edilen sonuçların uyum içerisinde olduğu sonucuna varılmaktadır. PVT ısı transfer mekanizmasının ayrıntılı olarak ortaya konduğu bu çalışma ile hem PVT sistemlerin, hem de diğer güneş enerjisi sistemlerinin modellemesi ve optimum tasarımları alanındaki çalışmalara yararlı olması umut edilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Fotovoltaik termal sistemler, 2D ısı transfer analizi, enerji verimi.

ABSTRACT

Among the building integrated solar energy systems, photovoltaic thermal systems (PVT) which supply both hot water and electricity demands have a growing interest. To achieve maximum energy efficiency and to operate at optimum working conditions, the thermodynamical modeling and detailed heat transfer analysis of PVT systems are required at the design level. In this study, a PVT system which was designed and experimentally tested at Uşak University, Engineering Faculty, Mechanical Engineering Department, using water as heat transfer fluid, consisting of mono-crystalline Si photovoltaic module has been modeled thermodynamically and carried out 2D heat transfer analysis by COMSOL Multiphysics. Determination coefficient, correlation coefficient, MSE and RMSE values between measured and calculated outlet temperatures were found as 0.94; 0.97; 3.67; and 1.92 respectively. For the average values, the of the system was calculated as 0.27 by experimental data, while the thermal efficiency was found as 0.22 by simulated results under the conditions of 620 W/m² solar radiation, 13°C ambient temperature and 20°C inlet water temperature. The overall energy efficiency of PVT module was found as 0.38 and 0.33 by experimental and simulated data

respectively. It could be concluded that the obtained results from the experiments and the simulations are consistent. With the detailed study on the heat transfer mechanism of PVT, it is hoped that the study is helpful for the other researchers on both PVT and solar energy systems to model and optimum designs.

Key words: Photovoltaic thermal, 2D heat transfer analysis, energy efficiency

1.Giriş

Artan nüfusun ve gelişen sanayinin enerji gereksinimi hızla artmakta, bu enerji gereksinimi mevcut kısıtlı kaynaklarla karşılanamamaktadır. Halen kullanılan petrol, doğalgaz, kömür gibi yenilenemeyen konvansiyonel enerji kaynakları çevreyi ve insan sağlığını tehdit etmekte olup bu kaynakların da giderek azalması ile yenilenebilir enerji kaynaklarından olan ilgi hızla artmaktadır. Güneş en önemli yenilenebilir enerji kaynaklarından biridir. Günümüzde güneş enerjisinden ısı enerjisi ve fotovoltaik dönüşüm ilkesinden yararlanılarak elektrik enerjisi üretmek yaygın olarak kullanılmaktadır. Fotovoltaik güneş panelleri, üzerlerine düşen güneş ışınımının sınırlı bir kısmını elektrik enerjisine dönüştürebilirler. Üretildikleri malzemenin özelliklerine bağlı olarak, çok farklı dalga boylarında ışınım içeren güneş enerjisinin yalnızca spektral cevap aralıklarına karşılık gelen bölümünü elektrığe çevirirken, büyük bir oranı fotovoltaik malzemede ısı yükü oluşturur. Oluşan bu aşırı ısı yükü, hem fotovoltaik panellerin anlık verimini düşürmekte, hem de uzun vadede malzemenin yapısını bozabilmektedir. Fotovoltaik panellerde elektrığe dönüştürülemeyen güneş ışınımının oluşturduğu bu aşırı ısı yükünü uzaklaştırmak ve değerlendirmek amacı ile fotovoltaik termal (PVT) sistemler tasarlanmıştır. PVT sistemler ile hem oluşan aşırı ısı yükü fotovoltaik malzemeden uzaklaştırılabilmekte, hem de bu enerjiden ısı olarak yararlanılabilmektedir. Böylece bir bakıma tek bir modülden hem elektrik hem ısı enerjisi elde eden bir enerji sistemi ortaya çıkmaktadır.

Fotovoltaik (PV) sistemlerde elektrığın yanı sıra ısı enerjisinin de kullanmayı amaçlayan PVT sistemleri üzerinde 1970'lerden bu yana çalışılmaktadır. Bu sistemlerde PV ve ısı sistemlerinin beraber kullanılması temeline dayanmaktadır. Literatürde, PVT sistemlerinin tasarımı, termodinamik analizi ve performanslarının değerlendirilmesi üzerine çok sayıda çalışma bulunmaktadır [1-20]. Diğer yandan, enerji sistemlerinin bilgisayar simülasyon programları ile ısı analizlerinin gerçekleştirilmesi son zamanlarda üzerinde önemle durulan ve hızla gelişen çalışma alanlarından biridir. Enerji sistemlerinin ısı analizleri ile optimum tasarımlar elde edilebilmekte, en uygun çalışma koşulları tanımlanabilmekte ve performans ölçütlerinin en uygun değerleri ortaya konulabilmektedir. Isı analizlerinin bilgisayar simülasyonları ile gerçekleştirilmesi birçok avantajı beraberinde getirmektedir. Farklı tasarım seçeneklerinin kolaylıkla incelenebilmesi, bileşenlerin planlanması, kontrol stratejileri geliştirilmesi ve farklı tüketim senaryolarının hızla ve kolay bir şekilde değerlendirilebilmesi simülasyon programlarının öne çıkan özellikleri olarak sıralanabilir. Literatürde PVT sistemlerinin simülasyon programları ile analizlerinin değerlendirildiği çok az sayıda çalışma mevcuttur.

Yang ve ark. (2012) PV panelin arkasına bakır boru ve fonksiyonel olarak derecelendirilmiş malzemenin (FDM) kullanıldığı yeni bir tip PVT tasarlamışlar, geliştirdikleri PVT tasarımını hem laboratuvar ortamında deneysel olarak, hem de sonlu elemanlar yöntemi (FEM) ile modellemişler ve bulguları karşılaştırmışlardır. Elde ettikleri simülasyon sonuçları ile deney sonuçlarının uyumlu olduğu sonucuna varmışlardır [21]. Fontenault ve Miravete (2012) teorik çalışmalarında ele aldıkları bir PVT sistemi COMSOL Multiphysics programı ile analiz etmişler, farklı akış hızı ve tabaka kalınlıkları için optimum PVT verimini modellemişlerdir [22]. Lee ve Tay (2012), PV modül verimlerinin sıcaklığa bağlı olduğunu vurgulayarak PV çalışma sıcaklıklarının modellenmesinin önemi üzerinde durmuşlar, ele aldıkları modülün her bir tabakanın sıcaklık dağılımlarını FEM ile belirlemişlerdir [23]. Solanki ve ark. (2009) tasarladıkları PVT modülü solar simülatör kullanarak iç mekanda test etmişler, çıkış suyu sıcaklığını MATLAB kullanarak çözümlemişler, elde ettikleri deneysel veriler ile sayısal sonuçları karşılaştırmışlardır [24]. Silva ve Fernandes (2010) hibrit fotovoltaik termal sistemlerin termodinamik modellemesini Simulink-Matlab ile gerçekleştirmişlerdir. Simülasyon çalışmalarının sonucunda, %15 termal, %9 u elektriksel olmak üzere toplamda %24 lük bir enerji verimi belirlemişlerdir [25].

Yüksek duyarlılıkta sonuç veren simülasyon programları PVT sistemlerin en uygun tasarım ve optimum performanslarının ortaya konulabilmesi için büyük bir kolaylık sağlamaktadır. Şöyle ki her an farklı güneş ışınımına maruz kalan bir PVT modül için optimum akış hızının deneysel olarak, farklı malzeme seçenekleri ve boyutlandırma için belirlenmesi, uzun zaman alan ve maliyeti yüksek bir uygulamadır. Ancak yüksek kesinliğe sahip bir simülasyon programı ile farklı malzeme ve boyutlandırma ile tasarlanan PVT modüller için optimum akış hızının belirlenmesi rahatlıkla gerçekleştirilebilir. Ancak bir simülasyon programı ile ısıl olarak modellenen bir enerji sisteminin deneysel olarak test edilmesi, deney sonuçlarının simülasyon sonuçları ile karşılaştırılması ve ortaya konan modellemenin duyarlılığı konusunda analizler yapılması gerekmektedir. Bu çalışmada, Uşak Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde tasarlanan ve deneysel olarak test edilen PVT sistemi, COMSOL Multiphysics yazılımı ile 2D olarak modellenmiş, ısı transfer analizi gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçlarından elde edilen çıkış suyu sıcaklığı ile simülasyondan elde edilen çıkış suyu sıcaklıkları karşılaştırılmış, sonuçların uyum içerisinde olduğu gözlenmiştir. Deneysel verilerle hesaplanan ısıl verim ile simülasyon sonuçları ile hesaplanan ısıl verim karşılaştırılmıştır. Böylelikle gerçekleştirilen ısıl analizin deney sonuçları ile uyumu değerlendirilmiştir. Çalışmanın 'Deneysel Yöntem' bölümünde PVT deney sistemi ve simülasyon modeli tanıtılmış, ısıl analiz modellemesi ortaya konulmuştur. 'Bulgular ve Tartışma' bölümünde deneysel çalışma ve simülasyon modelinin sonuçları bildirilmiş, istatistiksel olarak değerlendirilmiştir. Sonuç olarak elde edilen bulgular yorumlanmıştır.

2. DENEYSEL YÖNTEM

2.1. PVT Deney Sistemi

PVT deney sistemi Uşak Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde tasarlanmış ve test edilmiştir. Giriş ve çıkış suyu sıcaklıkları, suyun debisi, ortam sıcaklığı, güneş ışınımı, PVT'nin yüzey sıcaklığı ve elektriksel akım ve gerilim değerleri ölçümlenmiştir. Mart 2012 tarihinde gerçekleştirilen ölçümlerde 54 veri alınmıştır. Deneylerde test edilen PVT modülünün özellikleri Tablo 1'de sunulmuştur. PVT deney sisteminde kullanılan modülün arkasındaki tedlar tabakasına kaynaklı bakır borunun et kalınlığı 2 mm, çapı 8 mm ve uzunluğu ise 23 m'dir. PVT sistemin arkası cam yünü ile izole edilmiştir. Şekil 1'de PVT deney sisteminin görülmektedir.

Tablo 1. PVT Deney Sisteminde Kullanılan PV Modülünün Karakteristik Özellikleri

I_{sc}/I_{mp} (A)	8,154/7,586
V_{oc}/V_{mp} (V)	37,30/27,18
η_{pil} (%)	15,16
$\eta_{modül}$ (%)	13,69
Alan (m^2)	1,62
Ön Cam	Saydam, Temperlenmiş cam
Pilin Yapısı	Monokristal Si (156 mmx156 mm)
Pil Kapsüllenmesi	EVA (Etilen vinil asetat)
Arka tabaka	Tedlar
Çerçeve	Eloksal Alüminyum

PVT sistemin giriş ve çıkış suyunu ölçmede kullandığımız termometre Extech HD200 marka K tipi termal çiftidir. $-100^{\circ}C$ ile $1372^{\circ}C$ sıcaklıkları arasında % ± 0.15 hata ile arası ölçüm yapmaktadır. Sistemin yüzey sıcaklığı yine Extech HD200 termometresi ile ölçülmüştür. Cihazın ölçüm aralığı $-30^{\circ}C$ ile $+550^{\circ}C$ ve hata payı $\pm 2\%$ olarak bilinmektedir. Sistemin akım ve gerilim ölçümleri Steca PR2020 marka regülatör ile gerçekleştirilmiştir. Sistemin ışınım ölçümü $\pm 5\%$ kararlılıkla Delta OHM HD 2102.2 marka radyasyon cihazıyla ölçülmüştür. Cihazın ölçüm aralığı $0,1.10^{-3} W/m^2$ ile $2000 W/m^2$ dir. Ortam sıcaklığı ölçümleri ise Uşak Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde bulunan Davis VantagePro2 marka meteoroloji istasyonu ile $\pm 2^{\circ}C$ kararlılıkla ölçülmüştür.



(a)



(b)

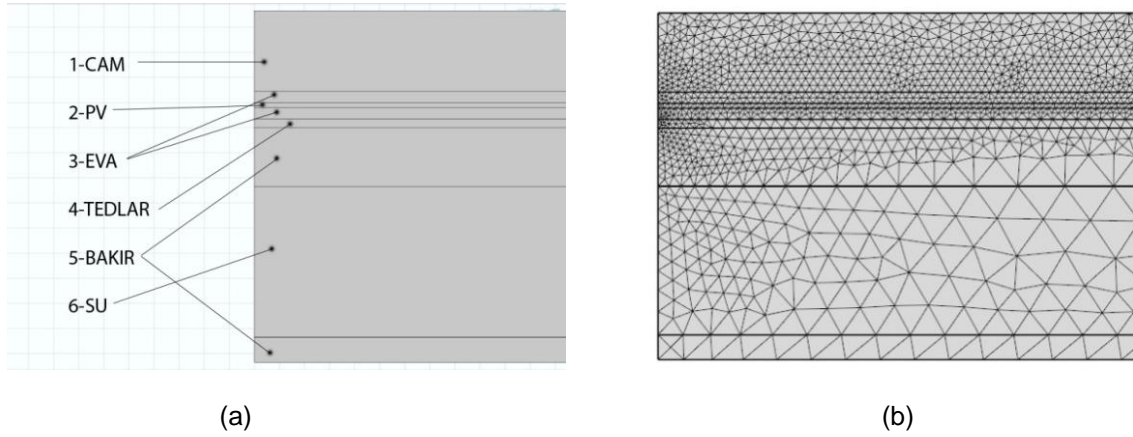
Şekil 1. Deneysel Sistemin Fotoğrafları (a) PVT deney sistemi yapısı, (b) PVT deney sistemi

2.2. 2D Simülasyon Modeli

Uşak Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde tasarlanan ve test edilen PVT modülünün ısı analizi COMSOL Multiphysics simülasyon programında gerçekleştirilmiştir. Şekil 2a ve 2b'de sırası ile simülasyonda tasarlanan PVT modül tabaka yapısı ve ağ örgü yapısı (mesh) görülmektedir. PVT güneş modülü ağ örgüsü oluşturma, COMSOL dâhili fizik kontrollü mesh düzen ayarını kullanır. İyileştirilmiş bir mesh tipi kullanılarak 920 cm PV genişliği için 108962 eleman oluşturulmuştur. İyileştirilmiş bir mesh ayarı, sonuçlarda ulaşılan kesinliği artırmakla birlikte sonuç verirken, COMSOL gerekli analizinde çözüm sürecinin uzamasına neden olmuştur. Model boyutları çok küçük olduğundan ince mesh yapılanmasının daha uygun olacağına karar verilmiştir.

Şekil 2'de görüldüğü gibi, simülasyonda tasarlanan PVT modül için, üstten alta doğru tabakalandırma sırası ile cam, EVA, PV hücre, EVA, Tedlar, bakır, su, bakır olarak belirlenmiştir. Bunun yanı sıra PVT en alt tabakasından 5 cm kalınlığında bir cam yünü ile yalıtım mevcuttur. En alt tabakada taşınım ile ısı kayıpları bu yalıtım nedeni ile ihmal edilmiştir. PVT nin en üst kısmında ise cam tabakasından çevreye ışınım ve taşınım ile ısı transferi gerçekleştiği kabulü ile hesaplar gerçekleştirilmiştir. Simülasyon çalışmasında deneylerde elde edilen veriler kullanılmış olup, bazı aşamalarda çeşitli kabuller yapılmıştır. Termodinamik analiz için yapılan kabuller aşağıda sıralanmıştır:

- Modelleme 2D olup bakır borunun tüm uzunluğu boyunca, PVT'nin tedlar tabakasına tamamen temas ettiği varsayılmıştır.
- PV katmanında, tabakanın tamamının PV hücrelerden oluştuğu kabul edilmiştir.
- PVT panelini oluşturan saydam cisimlerden camın yutuculuk değeri alınmıştır. EVA malzemesinin et kalınlığı göz önüne alındığında yalnızca iletimle ısı transferi hesaba katılmıştır.
- 23 metre boyundaki bakır boru 20 parçaya bölünüp parça parça analiz edilmiş olup, sürekli olduğu varsayılmıştır.
- Analiz standart atmosfer koşullarında ve sabit su sıcaklığında yapılmıştır.
- PVT'de su girişi, sıcaklık dağılımı üniform olarak kabul edilmiştir.
- Bakır borularda dolaşan su sıkıştırılmaz ve laminer olarak kabul edilmiştir.
- Su için kanal akışı paralel iki düzlem arası akış ile karakterize edilebilir.
- Rüzgâr hızı sabit ve 5 m/s olarak kabul edilmiş, taşınım katsayısı buna göre belirlenmiştir.
- PVT'nin üzerine gelen ışınım, suyun giriş sıcaklığı, ortam sıcaklığı deney düzeneğinden alınan veriler kullanılmıştır.
- PVT'nin yüzeyinde toz ve nemden kaynaklı etkiler hesaba alınmamıştır. Tamamen pürüzsüz kabul edilmiştir.
- Simülasyonda hesaplama kolaylığı bakımından bakır boru, 50 parça halinde çözümlenmiştir.



Şekil 2. Simulasyon (a) PVT modül tabaka yapısı (b) ağ örgü yapısı

Tablo 2’de deney sisteminde ve analizlerde kullanılan mono-kristal Si PV malzemenin tabakaları ve malzeme özellikleri sunulmuştur. Tabloda sunulan bilgiler, deneylerde kullanılan PV malzemenin temin edildiği AneIES firmasından sağlanmıştır. PV malzemeyi oluşturan cam, EVA PV ve arka yüzde kullanılan malzemelerin kalınlık, ısı iletim katsayısı ve ısı dirençleri ile ilgili bilgiler PV tabakasını oluşturan katmanların sıralanışına göre listelenmiştir. Termodinamik modellemede ısı iletim hesaplamaları bu veriler doğrultusunda gerçekleştirilmiştir.

Tablo 2. Deney Sisteminde ve Analizlerde Kullanılan PV Malzemenin Tabakaları ve Malzeme Özellikleri

PV Tabakaları	Kalınlık (mm)	Isı İletim Katsayısı (W/mK)	Isıl direnç (m ² K/W)
Cam	3,20	0,98	0,003265
EVA1	0,45	0,31	0,001452
PV hücre	0,20	150,00	0,000001
EVA2	0,45	0,31	0,001452
Arka yüz (Icosolar Polyamide)	0,35	0,23	0,001522

2.3. Kuramsal Temeller

Temel olarak PVT modülünde 3 şekilde ısı transferi gerçekleşir. Isı iletimi modülün her katmanında gözlemlenir. PVT çevresinde ise serbest ve zorlanmış taşınım ile ısı transferi oluşur. Aynı zamanda yüzeyde ışınım sonucu gerçekleşen ısı transferi de mevcuttur.. Bu bölümde, PVT ısı analizinde kullanılan kuramsal bağlantılar sunulmuştur. PVT modülün katmanlar arası ısı transferi genel denklemi Eşitlik [1] de verilmiştir [22]:

$$\nabla \cdot (k \nabla T) = 0 \quad [1]$$

PVT modülün alt ve üst yüzeylerinde zorlanmış taşınım denkliği:

$$q_{conv} = -h_{c,force} \cdot A \cdot (T_{pv} - T_o) \quad [2]$$

bağıntısı ile verilmektedir.

COMSOL kararlı hal sayısal çözümleme olarak akış denklemlerin bağıntısı Eşitlik [3] ve [4]’de aşağıdaki gibi verilmektedir.

$$\nabla \cdot (\rho u) = 0 \quad [3]$$

$$\rho u \cdot \nabla u = -\nabla p + \nabla \cdot (\mu(\nabla u + (\nabla u)^T)) \quad [4]$$

PVT modelindeki su akışı için ısı transfer denklemi:

$$\rho \cdot C_p u \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k \nabla T) \quad [5]$$

bağıntısı ile verilmektedir.

Eşitlik [6]'da ışınlama olan ısı kayıpları verilmektedir:

$$q_r = \varepsilon \cdot \sigma (T_{pv}^4 - T_o^4) \quad [6]$$

PV yüzeyine gelen güneş ışınlamının bir kısmı elektrik enerjisine dönüştürülmekte, elektrik enerjisine dönüştürülemeyen kısmı ise modüle ısı yükü oluşturmaktadır. Bu ısı yükü PV elektrik dönüşüm verimini etkilemektedir. Modül sıcaklığı arttıkça elektriksel dönüşüm verimi azalmaktadır. Çalışmada gerçekleştirilen modellemede, PVT modüle gelen güneş ışınlamının, elektrik enerjisine dönüşen ve ısı kayıplarla harcanan bölümünün dışında kalan kısmı bakır boruların içindeki suya aktarıldığı kabul edilmiştir. Bu nedenle PV'nin elektrik dönüşüm veriminin sıcaklığa bağlı değişimi de modelleme de dikkate alınmıştır. PV hücre elektrik verimi η_{pv} ; referans koşullardaki verimi η_{ref} , referans verimin belirlendiği PV hücre sıcaklığı T_{ref} , PV hücre sıcaklığı T_{pv} , β PV hücre verimliliğinin sıcaklıkla değişim katsayısı olmak eşitlik [7] de verilmiştir [26]:

$$\eta_{pv} = \eta_{ref} [1 - \beta (T_{pv} - T_{ref})] \quad [7]$$

Eşitlik [7] için T_{ref} 25°C, β ise 0,0045 K⁻¹ olarak alınmıştır.

Elektrik enerjisine dönüştürülen ve tüm ısı kayıpları çıkarıldıktan sonra kalarak bakır boruların içindeki suya aktarılan enerji miktarı sayesinde T_c değeri bulunabilir.

$$Q = \dot{m}_g C_{p,su} (T_g - T_c) \quad [8]$$

Bir PVT modülün toplam enerji verimi (η_{pvt}), elektriksel verimi (η_{pv}) ile ısı veriminin (η_{th}) toplamı olup aşağıdaki gibi verilmektedir:

$$\eta_{pvt} = \eta_{pv} + \eta_{th} \quad [9]$$

PVT modülün elektriksel verimi ve ısı verimi sırası ile aşağıdaki gibi hesaplanabilmektedir:

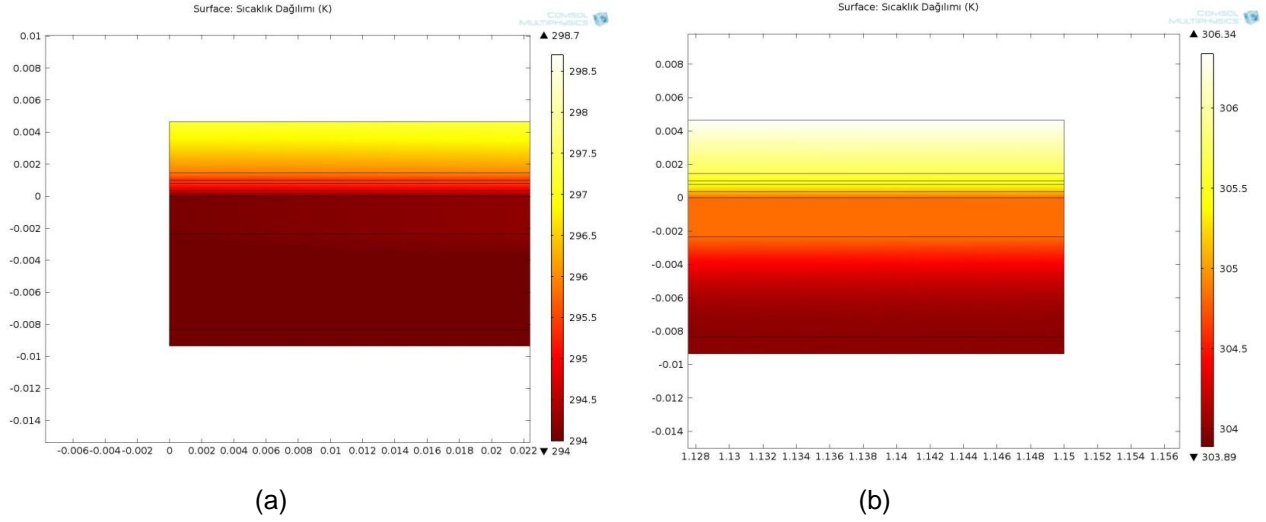
$$\eta_{pv} = \frac{V_m I_m}{A_{pv} I_t} \quad [10]$$

$$\eta_{th} = \frac{Q}{A_{pv} I_t} \quad [11]$$

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

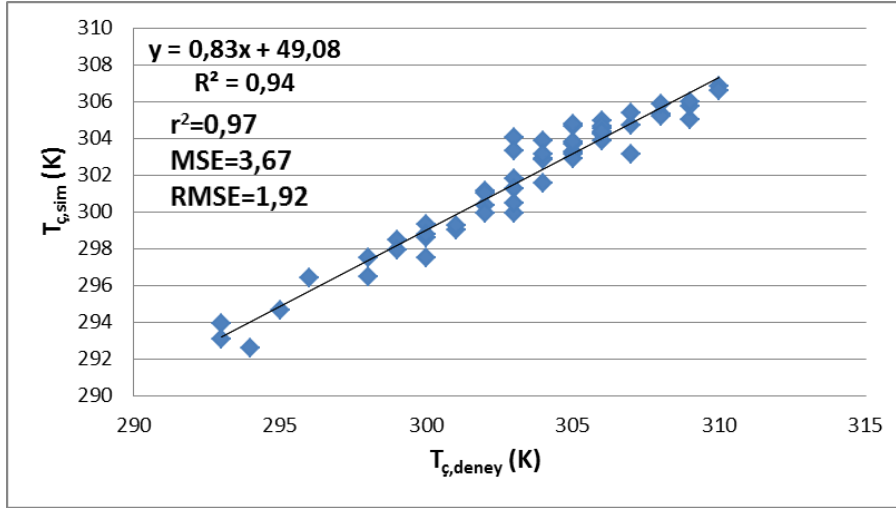
Bu çalışmada Uşak üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği'nde tasarlanan ve deneysel olarak test edilen PVT modül için FEM kullanılarak Comsol MultiPhysics programında bir simülasyon gerçekleştirilmiş, 2D ısı transfer analizi yapılmıştır. Deneylerden elde edilen sonuçlar ile simülasyon elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Deneyler sonucu bulunan çıkış suyu sıcaklıkları ile simülasyon ile ulaşılan çıkış suyu sıcaklıkları karşılaştırılmış, istatistiksel olarak değerlendirilmiştir. Bunun yanı sıra, PVT'nin ısı ve elektriksel verimi ortaya konmuş, verim eğrisi hem deneysel hem de simülasyon sonuçları ile karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Şekil 3'te, simülasyon programından alınan

ve PVT modülün giriş ve çıkış bölgeleri için saat 13:00 verileri dikkate alınarak modellenen sıcaklık dağılım görüntüleri sunulmaktadır. Şekil 2a'da gösterilen PVT tabaka yapısı hatırlanacak olursa, Şekil 3a'da giriş bölgesinde bakır borunun içinde dolaşan su sıcaklığı yaklaşık 296 K iken, çıkış bölgesini ifade eden Şekil 3b'de su sıcaklığının 305 K olduğu okunabilmektedir. Bu örnek için giriş ve çıkış suyu sıcaklıkları arasında 9 derecelik bir fark olduğu anlaşılmaktadır. PVT modülün ısıl analizini gerçekleştiren simülasyon programında tabakalardaki sıcaklık dağılımı rahatlıkla incelenebilmekte, tabakaları oluşturan malzeme farklılıkları ve boyutlandırma seçeneklerinde nasıl bir değişim oluşacağı belirlenebilmektedir.



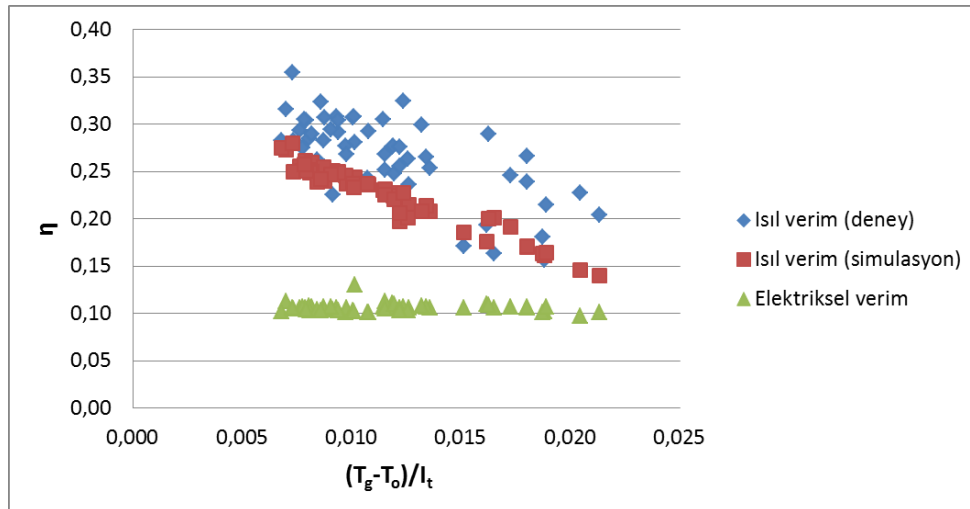
Şekil 3. Simülasyon Sisteminin Sıcaklık Dağılımı Görüntüsü, (a) giriş bölgesi, (b) çıkış bölgesi

Şekil 4'te deneysel olarak ölçümlenen PVT çıkış suyu sıcaklığı ile simülasyonla hesaplanan çıkış suyu sıcaklığı arasındaki ilişki ortaya konmuştur. PVT modül üzerine dik olarak düşen $323-780 \text{ W/m}^2$ güneş ışınımı ve $9-16^\circ\text{C}$ dış ortam sıcaklığı koşulları altında, giriş suyu sıcaklığı $16-23^\circ\text{C}$ arasında değişirken, deney sonuçlarına göre ölçümlenen PVT çıkış suyu sıcaklık değerlerinin $20-37^\circ\text{C}$ arasında, simülasyon sonucu elde edilen verilerle hesaplanan PVT çıkış suyu sıcaklık değerlerinin ise $20-34^\circ\text{C}$ arasında değiştiği bulunmuştur. Ortalama değerler üzerinden değerlendirildiğinde ise; 620 W/m^2 güneş ışınımı, 13°C dış ortam sıcaklığı koşulları altında, 20°C giriş suyu sıcaklığında, deneysel olarak ortalama çıkış sıcaklığı 30°C , simülasyonla ise 28°C olarak belirlenmiştir. Ölçümlenen ve model sonucu hesaplanan çıkış suyu sıcaklıkları arasındaki determinasyon katsayısı 0,94, korelasyon katsayısı 0,97; MSE (Mean Square Error) değeri 3,67 ve RMSE (Root Mean Square Error) değeri 1,92 olarak Excel istatistik fonksiyonu yardımı ile hesaplanmıştır. Buna göre deney ve simülasyondan elde edilen sonuçların uyum içinde olduğu sonucuna varılabilmektedir.



Şekil 4. Deneyel Olarak Bulunan Çıkış Suyu Sıcaklığı İle Simülasyonda Hesaplanan Çıkış Suyu Sıcaklığı Arasındaki İlişki

Şekil 5'te PVT modülün deneyel olarak bulunan ısı verim eğrisi, simülasyon sonuçları ile bulunan ısı verim eğrisi ve elektriksel verim eğrileri karakterize edilmiştir. PVT modül üzerine dik olarak düşen $323-780 \text{ W/m}^2$ güneş ışınımı ve $9-16^\circ\text{C}$ dış ortam sıcaklığı koşulları altında, deney sonuçlarına göre hesaplanan ısı verim değerlerinin $0,16$ ile $0,35$ arasında, simülasyon sonucu elde edilen verilerle hesaplanan ısı verim değerlerinin ise $0,14$ ile $0,28$ arasında değiştiği bulunmuştur. Bununla birlikte yine aynı meteorolojik koşullarda PVT modülün elektriksel veriminin ise $0,10$ ile $0,13$ arasında değerler aldığı görülmüştür. PVT modülün toplam veriminin, ısı ve elektriksel verimlerinin cebirsel toplamı olduğu hatırlanacak olursa, PVT toplam veriminin $0,30$ ile $0,63$ arasında değiştiği anlaşılmaktadır. Ortalama değerler üzerinden değerlendirilecek olursa; 620 W/m^2 güneş ışınımı, 13°C dış ortam sıcaklığı koşulları altında, 20°C giriş suyu sıcaklığında, deney sonuçlarına göre hesaplanan ortalama ısı verim $0,27$ olarak hesaplanırken, simülasyon sonuçlarına göre hesaplanan ortalama ısı verim $0,22$ olarak bulunmuştur. PVT modülün ortalama elektriksel verimi ise $0,11$ olarak hesaplanmıştır. PVT modülün Şekil 5'te verilen karakteristik verim eğrisi, verimin suyun giriş sıcaklığı ile dış ortam sıcaklığı arasındaki farkın yüzeye dik gelen ışınım oranına bağlı değişimini ifade etmektedir. Düşük dış ortam sıcaklıkları ve Uşak ilinde Mart ayının güneş ışınımı değerleri dikkate alındığında, tasarlanan PVT modülün yüksek ışınım değerlerinde daha yüksek verimlere ulaşabileceği açıktır. Bu toplam enerji verimi, tek bir modülde, hem elektrik üretimi hem de sıcak su eldesi amacına hizmet eden PVT sistemlerin potansiyelini ortaya koyma noktasında önemli bir gösterge olarak değerlendirilebilir.



Şekil 5. PVT Modülün Deneyel Olarak Bulunan Isıl Verim Eğrisi, Simülasyon Sonuçları İle Bulunan Isıl Verim Eğrisi ve Elektriksel Verim

SONUÇ

Bu çalışmada Uşak Üniversitesi Mühendislik Fakültesi'nde tasarlanan ve test edilen PVT modülün 2D termodinamik modellemesi gerçekleştirilmiştir. Deneysel elde edilen çıkış suyu sıcaklıkları ile simülasyondan hesaplanan çıkış suyu sıcaklıkları karşılaştırılmış, PVT modül için karakteristik verim eğrisi ortaya konmuştur. Ölçümlenen ve model sonucu hesaplanan çıkış suyu sıcaklıkları arasındaki determinasyon katsayısı 0,94, korelasyon katsayısı 0,97; MSE değeri 3,67 ve RMSE değeri 1,92 olarak bulunmuştur. Ortalama değerler üzerinden değerlendirilecek olursa; 620 W/m² güneş ışınımı, 13°C dış ortam sıcaklığı koşulları altında, 20°C giriş suyu sıcaklığında, deney sonuçlarına göre hesaplanan ortalama ısı verim 0,27 olarak hesaplanırken, simülasyon sonuçlarına göre hesaplanan ortalama ısı verim 0,22 olarak bulunmuştur. PVT modülün toplam enerji verimi ise deneysel olarak 0,38, simülasyon sonuçlarına göre 0,33 olarak ortaya konmuştur. Buna göre deney ve simülasyondan elde edilen sonuçların uyum içinde olduğu sonucuna varılmaktadır. Gerçek değerlere yakın sonuçlar sunan bu PVT modellemesi ile malzeme seçimi ve boyutlandırma deneyerek, en yüksek enerji verimine sahip PVT tasarımı gerçekleştirilebilecek, sürekli değişken olan güneş ışınımı etkisi altında gerçekleştirilen deneylerde saptanması zor olan optimum akış hızı gibi parametrelerin belirlenmesi kolaylaşacaktır. Çalışmanın bir sonraki aşamasında simülasyon kullanılarak en uygun tasarım ve optimum akış hızına yönelik incelemeler gerçekleştirilecektir. PVT ısı transfer mekanizmasının ayrıntılı olarak ortaya konduğu bu çalışma ile hem PVT sistemlerin, hem de diğer güneş enerjisi sistemlerinin modellemesi ve optimum tasarımları alanındaki çalışmalara yararlı olması umut edilmektedir.

Semboller

A	alan
C_p	özgül ısı
\dot{m}	kütleli debi
T	sıcaklık
V	gerilim
I	akım
k	ısı iletim katsayısı
q	ısı
h	taşıma
Q	suya aktarılan ısı oranı

Yunan harfleri

ϵ	yayma katsayısı
ρ	yoğunluk
σ	Stefan-boltzman sabiti
B	sıcaklıkla değişim katsayısı

Alt indisler

conv	taşıma
r	ışınım
g	giriş
ç	çıkış
o	çevre
force	zorlanmış
pv	fotovoltaik
pvt	fotovoltaik termal
ref	referans

Kısaltmalar

EVA	Etilen Vinil-Asetat
FEM	Sonlu Elemanlar Metodu
FDM	Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzeme
PV	Fotovoltaik
PVT	Fotovoltaik Termal

KAYNAKLAR

- [1] Hendrie, S.D., 'Evaluation of combined Photovoltaic/Thermal collectors. In: Proceedings of International Conference ISES', Atlanta, Georgia, USA, May 28 – June 1, vol. 3, pp. 1865–1869, 1979.
- [2] Florschuetz, L.W., 'Extention of the Hottel–Whillier model to the analysis of combined photovoltaic/thermal flat plate collectors', Solar Energy 22, 361–366, 1979.
- [3] Bhargava, A.K., Garg, H.P., Agarwal, R.K., 'Study of a hybrid solar system – Solar air heater combined with solar cells', Energy Conversion and Management 31, 471–479, 1991.
- [4] Prakash, J., 'Transient analysis of a photovoltaic-thermal solar collector for co-generation of electricity and hot air/water', Energy Conversion and Management 35, 972–976i, 1994.
- [5] Garg, H.P., Agarwal, P.K., 'Some aspects of a PV/T collector/forced circulation flat plate solar water heater with solar cells' Energy Conversion and Management 36 (87–99), 1995.
- [6] Sopian, K., Liu, H.T., Yigit, K.S., Kakac, S., Veziroglu, T.N., 'Perfromance analysis of photovoltaic thermal air heaters' Energy Conversion and Management 37 (11), 1657–1670, 1996.
- [7] Garg, H.P., Adhikari, R.S., 'Performance analysis of a hybrid photovoltaic/thermal (PV/T) collector with integrated CPC troughs' International Journal of Energy Research 23, 1295–1304, 1999.
- [8] Yang, H.X, Marshall, G.H., Brinkworth, B.J., 'An experimental study of the thermal regulation of a PV-clad building roof', 1994.
- [9] Brinkworth, B.J., Cross, B.M., Marshall, R.H., Hongxing, Yang, 'Thermal regulation of photovoltaic cladding', Solar Energy 61, 169–179, 1997.
- [10] Moshfegh, B., Sandberg, M., 'Flow and heat transfer in the air gap behind photovoltaic panels', Renewable and Sustainable Energy Reviews 2, 287–301, 1998.
- [11] Schroer et al., 'Hybrid thermal insulating PV facade elements', In: Proceedings of 2nd World Conference On Photovoltaic Solar Energy Conversion , 6–10 July, Vienna, Austria, pp. 2591–2593, 1998.
- [12] Brinkworth, B.J., 'Estimation of flow and heat transfer for the design of PV cooling ducts', Solar Energy 69, 320–413, 2000.
- [13] Eicker, U., Fux, V., Infield, D., Mei, Li, 'Heating and cooling of combined PV-solar air collectors facades', In: Proceedings of International Conference of 16th European PV solar energy. 1–5 May Glasgow, UK, pp. 1836–1839, 2000.
- [14] Brinkworth, B.J., Sandberg, M., 'Design procedure for cooling ducts to minimise efficiency loss due to temperature rise in PV arrays', Solar Energy 80, 89–103, 2006.
- [15] Bergene, T., Lovvik, O.M., 'Model calculations on a flat-plate solar heat collector with integrated solar cells', Solar Energy 55, 453–462, 1995.
- [16] Elazari, A., 'Multi Solar System – Solar multimodule for electrical and hot water supply for residentially building', In: Proceedings of 2nd World Conference On Photovoltaic Solar Energy Conversion, 6–10 July, Vienna, Austria, pp. 2430–2433, 1998.
- [17] Hausler, T., Rogash, H., 'Latent heat storage of photovoltaics', In: Proceedings of 16th Europ. PV Solar Energy Conference, 1–5 May, Glasgow, UK, vol III, pp. 265–267, 2000.
- [18] Kalogirou, S.A., 'Use of TRNSYS for modelling and simulation of a hybrid PV-Thermal solar system for Cyprus', Renewable Energy 23, 247–260, 2001.
- [19] Tripanagnostopoulos, Y., Nousia, T.H., Souliotis, M., Yanoulis, P., Hybrid photovoltaic/thermal systems. Solar Energy. (72): 217-234, 2002.
- [20] Tripanagnostopoulos, Y , 'Aspects and improvements of hybrid photovoltaic/thermal solar energy systems', Solar Energy 81 1117–1131, 2007.

- [21] Yang DJ, Yuan Z.F., Lee P.H., Yin H.M., ‘Simulation and experimental validation of heat transfer in a novel hybrid solar panel’, Heat and Mass Transfer 55 1076-1082, 2012.
- [22] Fontenault, B.J., ‘Modeling a combined photovoltaic-thermal solar panel’, 2012 COMSOL Conference, 2012.
- [23] Lee Y., Tay A.A.O., ‘Finite element thermal analysis of a solar photovoltaic module’ Energy Procedia 15, 413-420, 2012.
- [24] Solanki S.C., Dubey S., Tiwari A., ‘Indoor simulation and testing of photovoltaic thermal (PV/T) air collectors’, Applied Energy 86, 2421-2428, 2009.
- [25] Silva R.M., Fernandes J.L.M., ‘Hybrid photovoltaic/thermal (PV/T) solar systems simulation with Simulink/Matlab’ Solar Energy 84, 1985-1996, 2010.
- [26] E. Skoplaki and J.A. Palyvos, On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency/power correlations, Solar Energy 83 (2009) 614-624.

ÖZGEÇMİŞ

Canan KANDİLLİ

1978 yılı Karabük doğumludur. Doktora öğrenimini Ege Üniversitesi Güneş Enerjisi Enstitüsü’nde 2007 yılında tamamlamıştır. 2002-2008 yılları arasında Araştırma Görevlisi olarak görev yapmıştır. 2008 yılından bu yana Uşak Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü Enerji Anabilim Dalı’nda öğretim üyeliği yapmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynakları, enerji verimliliği ve yoğunlaştırıcı güneş enerjisi sistemleri konularında çalışmakta olup, evli ve bir çocuk annesidir.

Gürhan KÜLAHLI

1988 yılı Bursa doğumludur. 2011 yılında Uşak Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümünü bitirmiştir. Aynı yıl Uşak Üniversitesi’nde yüksek lisans eğitimine başlamış olup halen devam etmektedir. Uşak Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümü Enerji Anabilim Dalı’nda yürütülmekte olan 110M039 nolu TÜBİTAK projesinde burslu öğrenci olarak görev yapmaktadır.

Gültekin SAVCI

1985 yılı Cizre doğumludur. 2005 yılında Mersin Anadolu Hacı Sabancı Lisesi Mezun oldu. 2007’de Uşak Üniversitesi Makine Mühendisliğinde başladığı eğitimini 2012’de tamamlayarak, ASEM Çelik Yapı Müh. Taah. San. Ve Ltd. Şti. de Proje Amiri olarak kariyerine başladı. Üniversitede yapmış olduğu proje çalışmaları, “Fotovoltaik-termal sisteminin Comsol Multiphysics ile analizinin gerçekleştirilmesi ve deneysel sonuçlarının karşılaştırılması”, “Plakalı Eşanjörlerin Akış Analizi” ve “Dizel Yakıt Enjektörlerinin Araştırılması” şeklinde sıralanabilir.